



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Bestemmelse af jords mættede hydrauliske ledningsevne og sorptivitet

Lund, Willy; Møldrup, Per; Sørensen, Kirsten Bendix

Published in:

NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992

Publication date:
1992

Document Version
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Lund, W., Møldrup, P., & Sørensen, K. B. (1992). Bestemmelse af jords mættede hydrauliske ledningsevne og sorptivitet. I *NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992: Artikler til NGM-92: Session 1-4* (Bind 1/3, s. 223-228). Dansk Geoteknisk Forening. DGF-bulletin Nr. 9

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

HB7.

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

Vol 1 / 3

Artikler til NGM-92: Session 1-4

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

Vol 1 / 3

Artikler til NGM-92: Session 1-4

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



**DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING**

Bestemmelse af jords mættede hydrauliske ledningsevne og sorptivitet

Af

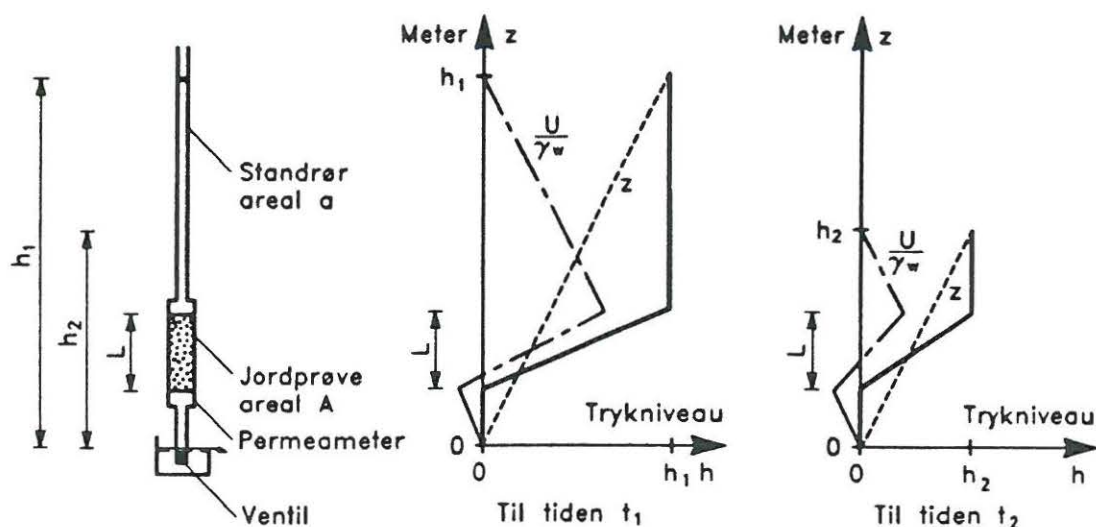
Willy Lund, Per Møldrup og Kirsten B. Sørensen Aalborg Universitetscenter

ABSTRACT

An integrated system for measuring the soil saturated hydraulic conductivity and the soil - water sorptivity using undisturbed soil cores is presented. The system consists of a soil core sampler, a soil core dryer, a vertical infiltration apparatus and a falling head apparatus. Use of the system is illustrated on undisturbed sand cores.

BESTEMMELSE AF MÆTTET HYDRAULISK LEDNINGSEVNE k_s

Strømningsforsøg med intakte jordsøjler er udført i et Falling Head apparat, der beskrives senere. Resultaterne af disse quasi-stationære strømninger anvendes til bestemmelse af jordsøjlernes k_s -værdier ved brug af Darcy's lov og kontinuitetsligningen, der gælder for stationære strømninger. Betydningen af den tilnærmede teoris anvendelse er analyseret, og både inertikræfter og magasinering kan negligeres (Lund 1989).



Figur 1: Strømningsforsøg med faldende trykniveau.

Forsøgsopstillingen, der er vist på figur 1, består af et permeameter, der indeholder jordsøjlen, et standrør og en overløbsanordning.

Når ventilen ved den nederste beholder åbnes, falder vandspejlet i standrøret, og i jordprøven foregår en parallelstrømning. Vandspejlet i den nederste beholder holdes i konstant niveau ved hjælp af overløbsanordningen.

Til tiden t_1 og t_2 er vandspejlsforskellen henholdsvis h_1 og h_2 . Forudsættes, at hele trykniveauforskellen bruges til at overvinde modstanden mod strømningen i jordprøven, bliver fordelingen af trykniveau og poretryk som vist på figur 1.

Tilstanden til tiden t betragtes. Kontinuitetsligningen $-\frac{dh}{dt} \cdot a = A \cdot v$ og Darcy's lov $v = k_s \cdot i$ giver:

$$\ln h = -\frac{A}{a} \cdot \frac{k_s}{L} \cdot t + \ln h_1 \quad (1)$$

Optegnes sammenhængen mellem trykniveau og tiden på semilogaritmisk papir, bestemmes $k_s = M \cdot \frac{a \cdot L}{A}$, hvor M er hældningen på den rette linie. Når forsøgene udføres, er det nødvendigt at kende en vandspejlsforskel, der angiver $1/2 t_2$, når $t_1 = 0$. Af ligning (1) fås:

$$h = \sqrt{h_1 \cdot h_2}, \text{ når } t = \frac{1}{2} t_2 \quad (2)$$

BESTEMMELSE AF SORPTIVITETEN S

Sorptiviteten S ($\text{cm min}^{-1/2}$) anvendes til at karakterisere en ikke-vandmættet (umættet) jords infiltrationsevne som funktion af kvadratroden af tiden. Desuden kan måling af S sammen med anvendelse af geostatistiske beregningsmetoder benyttes til at vurdere en jords umættede hydrauliske ledningsevne som funktion af jordens vandindhold.

I det følgende præsenteres en metode til bestemmelse af S ud fra data opnået ved et vertikalt infiltrationsforsøg ved et givet konstant (med tiden) overtryk H (cm) ved jordoverfladen og et givet konstant (med dybden) initielt vandindhold Θ_i i jorden. Overtrykket H svarer i praksis til at have et konstant vandlag af højden H over jordoverfladen (jvf. Fig. 2a).

Den styrende differentialligning for vertikal vandstrømning i umættet jord er

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\Theta) \frac{d\psi}{d\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} - k(\Theta) \right) \quad (3)$$

hvor Θ er jordens vandindhold ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ψ er porevandstrykket (cm), k er jordens hydrauliske ledningsevne (funktion af jordens vandindhold) (cm min^{-1}), t er tiden (min) og z er dybden under jordoverfladen (cm). Under begyndelses- og randbetingelser svarende til ovennævnte infiltrationsforsøg, (i.e. $\Theta = \Theta_i$, $t = 0$, $z > 0$ og $\psi = H$, $t > 0$, $z = 0$) kan ligning (3) løses analytisk (eksakt), hvorved der fremkommer et udtryk for den akkumulerede mængde af infiltreret vand I_{akk} (cm) som funktion af tiden

$$I_{akk} = k_i t + \frac{(H - H_b)(\Theta_f - \Theta_i)k_f}{v_{inf} - k_f} + \frac{S^2 + 2H_b k_f(\Theta_f - \Theta_i)}{2\delta(k_f - k_i)} \ln \left(1 + \delta \frac{k_f - k_i}{v_{inf} - k_f} \right) \quad (4)$$

hvor v_{inf} er infiltrationshastigheden (cm min^{-1}), Θ_f er jordens naturlige vandmætning ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) ved det påtvungne overtryk H (Θ_f vil typisk være nogle få volumenprocent mindre

end jordens fulde (effektive) vandmætning Θ_s), k_i og k_f er jordens hydrauliske ledningsevne (cm min^{-1}) ved vandindhold lig med henholdsvis Θ_i og Θ_f , H_b er jordens luftindtagstryk (det tryk, der skal påføres for at tvinge vand ud af en naturlig vandmættet jord) (cm) og δ er en empirisk konstant med en værdi mellem 0 og 1. I praksis kan δ sættes lig 1, k_i lig 0 (idet $k_f \gg k_i$ ved infiltration i en initielt tør jord) og $H_b = 0$ (vurderet ud fra en følsomhedsanalyse). S kan nu isoleres i ligning (4) med $\delta = 1$, $k_i = 0$ og $H_b = 0$, i.e. (Møldrup, 1992).

$$S = \sqrt{2k_f \left(\frac{I_{akk} - \frac{k_f H(\Theta_f - \Theta_i)}{v_{inf} - k_f}}{\ln(1 + \frac{k_f}{v_{inf} - k_f})} \right)} \quad (5)$$

Ved samhørende målinger af I_{akk} og t kan v_{inf} bestemmes som $\Delta I_{akk} / \Delta t$, og S kan dernæst bestemmes udfra ligning (5), hvis k_f er målt. Hver sæt samhørende data for t , I_{akk} og v_{inf} giver en beregnet S værdi. Middelværdien af de beregnede S værdier udgør det resulterende estimat for S . Den tilhørende standardafvigelse på S udtrykker usikkerheden på S estimatet, samt hvor godt den anvendte infiltrationsteori (ligning (4)) stemmer overens med de aktuelle infiltrationsdata.

Ligning (5) er numerisk stabil, hvis følgende betingelser er overholdt (Møldrup, 1992):

$$v_{inf} > 2 k_f \quad \text{og} \quad v_{inf} > k_f \left(\frac{H(\Theta_f - \Theta_i)}{I_{akk}} + 1 \right) \quad (6)$$

Hvis det enkelte datasæt for t , I_{akk} og v_{inf} ikke overholder disse to betingelser (ligning (6)), bør datasættet udelades i S beregningen.

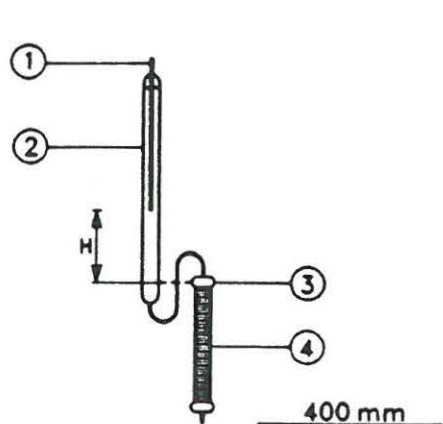
MÅLEUDSTYR OG MÅLEMETODER

Prøveoptager til udtagning af intakte jordsøjler

Den nyudviklede prøveoptager er udført i rustfrit stål og vist i figur 3. Den er konstrueret til at optage intakte jordsøjler i acrylplastrør. Jordprøvens dimension: $L = 20$ cm og $D = 3.4$ cm. Et acrylplastrør med afdrejede endeflader fastspændes i prøveoptageren. Når prøveoptagerens topstykke er monteret, iskrues en rundjernsstang med bærestykke. Prøveoptageren presses eller rammes i jorden indtil jordsøjlen fylder hele acrylplastrøret. Når prøveoptageren skal trækkes op, er der mulighed for at påføre jordsøjleens overside et mindre vakuum for at forhindre, at jordprøven glider ud.

Udstyr til tørring af intakt udtagne jordprøver

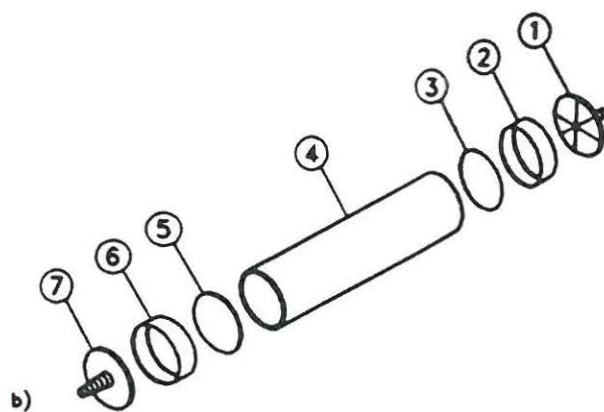
De intakt udtagede prøver anbringes i stativ som vist på figur 4 og gennemluftes med atmosfærisk luft i 2 døgn med et vacuum på 20 cm vandsøjle. Luften er forud rensat og tørret ved at være ledt igennem koncentreret svovlsyre ved ca. 20°C . Vandindholdet efter tørring Θ_i skal være ensartet både i dybden af den enkelte søjle og i samtlige tørrede søjler. Vandindholdet vil efter 2 døgn tørring erfaringsmæssigt nå ned på 2 - 4 volumenprocent, afhængig af jordtypen.



a)

- 1 Luftindtag
- 2 Burette med vand
- 3 Søjletop med porøs plade
- 4 Jordsejle

Figur 2a: Vertikal infiltration.



b)

- 1 Millex FG 50 filter
- 2 PVC samlemuffe
- 3 GFC-filter
- 4 Acrylrør
- 5 Rubo glasfilter 40mm, 40-100 μ m
- 6 Som 1
- 7 Som 2

Figur 2b: Adskilt sejle.

Udstyr til vertikal infiltration i jord

Udstyret er vist i figur 5 og består af en burette med deioniseret vand og en søjle med en intakt udtaget jordprøve.

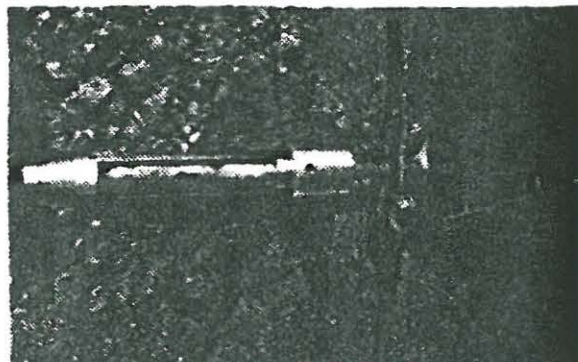
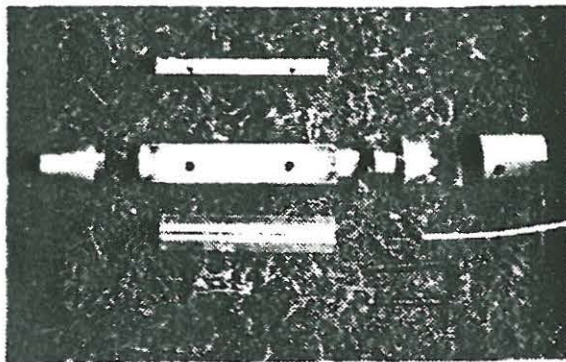
Luftindtaget på buretten er regulerbart. Udstyret kan derved anvendes til infiltrationsforsøg med "mættet rand" ($H = 0$) eller overtryksrand, som svarer til at have et konstant vandlag af en veldefineret højde H over jordoverfladen (jvf. figur 2a).

Buretten er af glas eller acrylplast med indvendig diameter på 34 mm. I forsøget blev anvendt et acrylplastrør på 55 cm inddelt med mulighed for aflæsning pr. 2 ml ved 20°C. Buretten er i toppen lukket med en gummiprop med hul, hvorigennem der er trukket en plastslange. Denne slange anvendes til luftindtag og kan trækkes op og ned for at kunne ændre højden H uden falsk indtag af luft. Burettens bund er vandret, så vandsøjleens tryk overføres korrekt. En 2-vejs-ventil anvendes til at starte og afbryde infiltrationsforsøget.

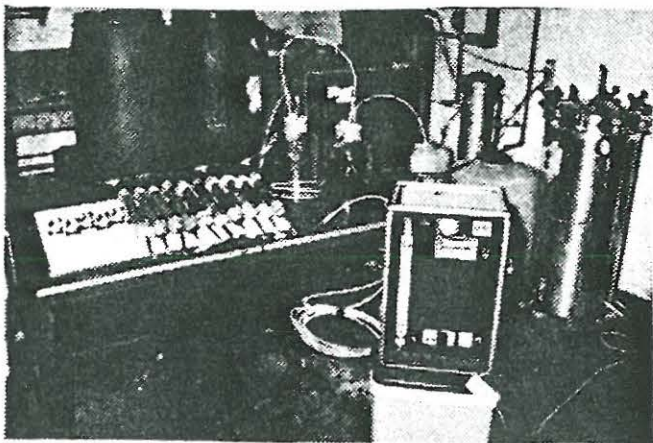
Søjlen med jordprøven er af acrylplast med en længde på 30 cm og en indvendig og udvendig diameter på henholdsvis 34 og 40 mm. Figur 2a viser opstillingen parat til infiltrationsforsøget, figur 2b viser en tegning af en adskilt sejle.

Falling Head udstyr

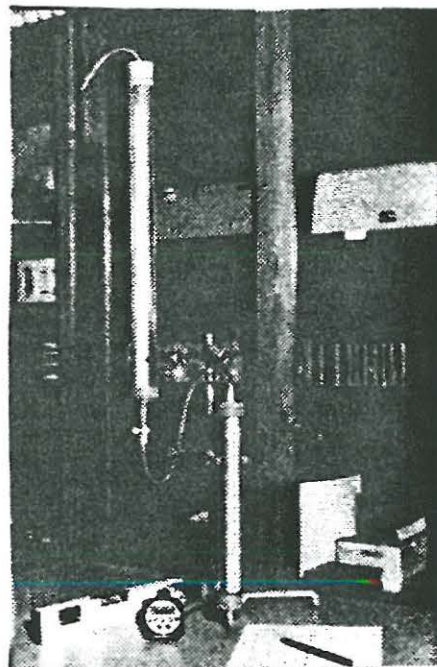
Det nyudviklede strømningsapparat er vist i figur 6. Strømningsforsøgene udføres med deioniseret vand, der er udluftet ved kogning. Kogningen foregår i vakuum ved en temperatur på ca. 25°C. En intakt jordsøjle i acrylplastrør forsynes med et glasfilter på begge ender og placeres i apparatet. Jordsøjlen påføres et vakuum på 70 kPa og vandmættes fra undersiden. Vakuum i jordsøjlen fastholdes under hele vandmætningen. For at opnå 100% vandmætning skal mætningen forløbe langsomt - varighed ca. 1/2 time. Standrøret fyldes med vand, og der udføres strømningsforsøg med den vandmættede jordprøve. Vandmængde



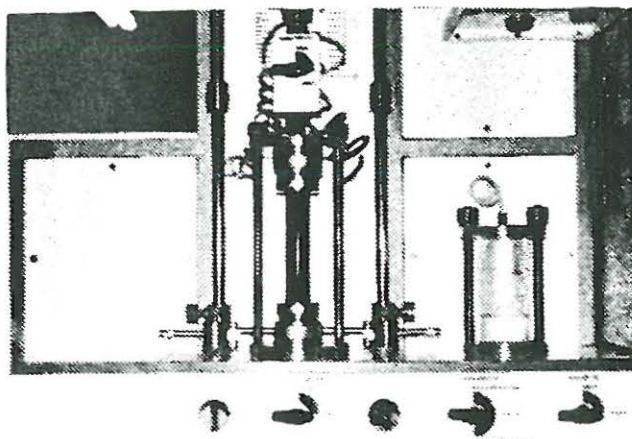
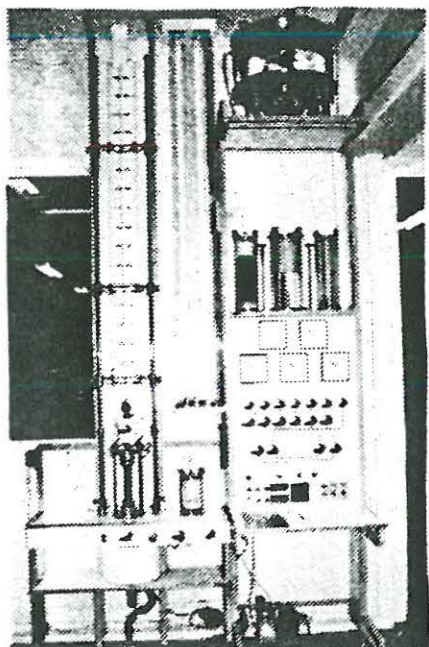
Figur 3: Prøveoptager til udtagning af intakte jordsøjler. a: Enkeltdeler. b: Samlet med udtaget jordsøjle.



Figur 4: Udstyr til tørring af jordsøjler.



Figur 5: Udstyr til vertikal infiltrationsforsøg.



Figur 6: Falling Head udstyr til måling af hydraulisk ledningsevne. a: Overblik. b: Detalje af jordsøjle.

og tid registreres med fotoceller placeret ved standrøret. Der udføres to til tre strømningssforsøg på hver jordsøjle. Hvis strømningstiderne er ens, og halvdelen af strømningstiden bruges mellem vandspejlsforskellen h_1 og $\sqrt{h_1 \cdot h_2}$, er forsøget lykkedes. I permeameteret er indbygget temperaturfølere over og under jordsøjlen. Efter forsøget kontrolleres, at vandmætningen har været effektiv og poretal udregnes.

Den mættede hydrauliske ledningsevne k_s bestemmes og omregnes til ledningsevnen ved 20°C. Enkelte porer i den vandmættede jordprøve åbnes ved hjælp af vakuum, og der udføres strømningssforsøg som beskrevet før med den delvis mættede jordsøjle. Mætningsgraden S_w bestemmes, og den umættede hydrauliske ledningsevne k_{s_w} ved 20°C udregnes.

MÅLERESULTATER OG DATABEHANDLING

Resultater fra strømningssforsøg i Falling Head apparat.

Søjle nr.	Poretal e	$k_s \cdot 10^{-5}$ m/sec	S_w	$k_{s_w} \cdot 10^{-5}$ m/sec
21	0.651	5.07	0.90	1.89
22	0.594	6.58	0.99	2.35
23	0.655	5.09	0.89	1.49
25	0.683	2.34	0.92	1.41
29	0.652	6.45	0.95	3.57
30	0.608	4.15	0.91	1.85
32	0.671	7.94	0.90	2.38
33	0.674	7.41	0.89	2.47
35	0.606	5.93	0.89	1.46

De undersøgte jordsøjler er en sandet muldjord udtaget i Jyndevad (Sønderjylland) med følgende klassifikationsegenskaber. Silt 4%, sand 93% og grus 3%. Uensformighedstal $U = d_{60}/d_{10} = 2.9$. Middelkornstørrelse $d_{50} = 0.3$ mm. Relativ densitet $d_s = 2.59$. Kalkindhold $ka = 0.6\%$. Reduceret glødetab rgl. = 3.5%.

Figur 7: Mættet (k_s) og umættet (k_{s_w}) hydraulisk ledningsevne.

Resultater fra vertikale infiltrationsforsøg med 2.5 cm overtryk.

Søjle nr.	$N^{(1)}$	$\Theta_i^{(2)}$ cm ³ cm ⁻³	$\Theta_f^{(2)}$ cm ³ cm ⁻³	$k_f^{(3)}$ cm min ⁻¹	H cm	$S^{(4)}$ cm min ^{-1/2}
21	15	0.021	0.325	0.064	2.5	1.23 ± 0.27
22	17	0.022	0.334	0.060	2.5	1.11 ± 0.36
25	17	0.024	0.358	0.058	2.5	1.88 ± 0.30
29	17	0.023	0.332	0.068	2.5	1.75 ± 0.36
30	17	0.020	0.329	0.077	2.5	1.46 ± 0.22

Figur 8: Resultattabel for S estimering. (1) Antal datasæt for (t , I_{akk} , V_{int}). (2) Målt i forbindelse med infiltrationsforsøget. (3) Bestemt ud fra Falling Head målinger af $k(\Theta)$. (4) Middelværdi ± standardafvigelse.

REFERENCER

- Lund, W. (1989): Notat om strømningssforsøg med faldende trykniveau. Aalborg Universitetscenter.
- Møldrup, P. (1992): A note on estimating the soil-water sorptivity from vertical infiltration experiments. Foreløbig titel. Indsendes for publikation i *Soil Sci.*